もう一度学ぶ電磁気学の世界



第24回（最終回）
システム設計と電磁気学

小暮裕明

ボードの記事　ビギナーズ

電気のエンジニアでも取っつきにくいと言われる電磁気学を学び直す連載でしたが，卒業を迎えることになりました．身近な回路を電磁気学の世界としてとらえ直すことで分かったことがたくさんありました．このあたりで，筆者が長年かかわってきたシステム設計の観点から総まとめをして最終回とします．

（筆者）

1．*S*パラメータとブラックボックス

初めて電磁界シミュレータを使った15年ほど前，マイクロストリップ線路の例題で表示されたのがSパラメータでした．その意味が分からず，マニュアルを読みあさったことを覚えています．

学生時代に使ったマイクロ波の教科書(1)には，導波管回路の特性を表す散乱係数が載っていました．**図1**は右端が短絡された導波管です．左端に基準面T（電磁界シミュレータでは参照面“reference plane”と呼ぶ）があります．導波管の開口部には直接電圧をかけられないため，特定のモードの電界と磁界から等価的な電圧と電流注1を定めることにします．このときTにおける電圧の入射波をV_a，反射波をV_bとすれば，反射係数Γ_Tは次の式で表されます．

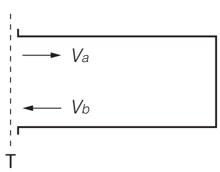


図1
右端が短絡されている導波管
Tは基準面．V_aはTにおける電圧の入射波，V_bは反射波．

$$\Gamma_T = \frac{V_b}{V_a} \quad \cdots\cdots(1)$$

導波管と短絡板が理想導体で作られていれば，式(1)からΓ_Tは1，つまり全反射になります．しかし実際には導体損がありますから$V_a > V_b$となり，可変減衰器（本誌2005年12月号，pp.123-130の連載第15回を参照）のように抵抗体が入っていれば，さらにV_bは小さくなります．

図1は1開口素子なので，Tで観測される量だけでその特性を示すことができるわけです．またここで重要なのは，導波管内の構造には着目せずに，ブラックボックスとして扱っていることです．

● *S*パラメータの定義

図2は2開口素子です．今度はT_1における入射波V_{a1}は，反射波V_{b1}とT_2における透過波V_{b2}に分かれます．右側の開口2の入射波V_{a2}についても同じことが考えられます．

そこで**図3**のようにT_1における入射波をa_1，反射波をb_1としたとき，入射電力P_{a1}と反射電力P_{b1}には次の関係があるとします．

$$P_{a1} = \frac{1}{2} a_1 a_1^* = \frac{1}{2} \left| a_1 \right|^2 \quad \cdots\cdots(2)$$

$$P_{b1} = \frac{1}{2} b_1 b_1^* = \frac{1}{2} \left| b_1 \right|^2 \quad \cdots\cdots(3)$$

a_1，b_1は振幅と位相を含む複素量で，*は共役複素数を表す．

注1：等価的な電圧と電流とは，導波管の伝送電力が電界・磁界で計算したときと等しくなるように計算した電圧・電流．

KeyWord　*S*パラメータ，電磁界シミュレータ，導波管，重ね合わせの原理，*n*開口素子，無反射終端，反射係数，透過係数，散乱，行列力学，システム工学，ブラックボックス，伝達関数，TLM法

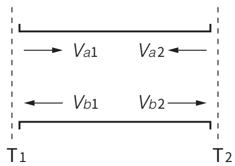


図2　2開口の導波管

T_1における入射波V_{a1}は，反射波V_{b1}とT_2における透過波V_{b2}に分かれる．

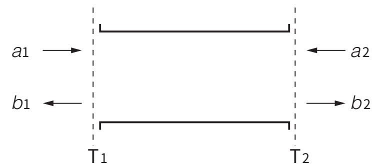


図3　2開口素子の入射波と反射波

T_1における入射波をa_1，反射波をb_1とする．また，T_2における入射波をa_2，反射波をb_2とする．

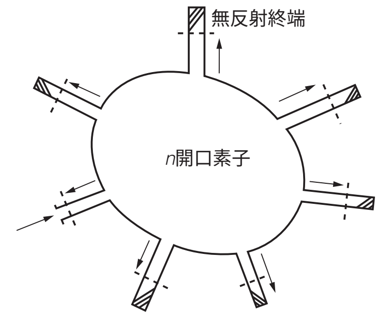


図4　*n*開口素子の回路

***n*開口の一つから入射し，それ以外の開口には無反射終端を接続する．**

このように，それぞれの波の電力が式(2)および式(3)で与えられるような値に選んだ振幅a_1やb_1を，特に正規化された振幅と言います．また右側の開口2についても，T_2におけるa_2とb_2を同じように定義すれば，a_1，b_1およびa_2，b_2には重ね合わせの原理[注2]が成り立ち，反射波b_1，b_2は入射波a_1，a_2のそれぞれの量に比例した量の和で表現できます．

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases} \quad \cdots\cdots(4)$$

図4のようにn開口素子に一般化して行列表現すると，

$$[b]=[S][a]$$

$$[b]=\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix},\ [S]=\begin{bmatrix} S_{11}S_{12}\cdots S_{1n} \\ S_{21}S_{22}\cdots S_{2n} \\ \vdots \\ S_{n1}S_{n2}\cdots S_{nn} \end{bmatrix},\ [a]=\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots(5)$$

ここで，$[S_{ij}]$を散乱行列またはS行列と言い，それぞれの要素S_{ij}を散乱係数あるいはSパラメータと言います．

● *S*パラメータの物理的な意味

図5は，**図3**の右側の開口2に無反射終端抵抗を接続した場合です．開口2は無反射なので$a_2＝0$とすれば，式(4)は，

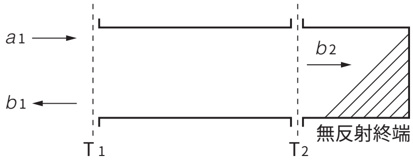


図5　無反射終端を接続した2開口の導波管

開口2は無反射なので$a_2＝0$となる．

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 \\ b_2 = S_{21}a_1 \end{cases} \quad \cdots\cdots(6)$$

となり，

$$\begin{cases} S_{11} = \dfrac{b_1}{a_1} \\ S_{21} = \dfrac{b_2}{a_1} \end{cases} \quad \cdots\cdots(7)$$

が得られます．これにより，S_{11}はT_1における反射係数，S_{21}はT_1，T_2における透過係数を表すことが分かります．

散乱(scattering)という語感からは，電波あるいは光が物体に当たって四方へ飛び散るようすを思い浮かべるでしょう．自由空間にあるガラスのような物体に光が当たれば，**図6**のように物体の表面で反射して残りが透過するので，式(7)に対応づけられます．そこで，この物体の特性をS_{11}やS_{21}によって表すことが考えられました．光を電気(電磁エネルギー)に置き換えれば，基準面T_1，T_2は端子対(ポート)に，また物体は基板上の回路(線路や素子)に相当します．

図7はレーダが物体を検出するしくみを表しています．散乱体に平面波(本誌2004年11月号，pp.139-146の連載第7回を参照)が入射すると表面に電流が流れ，これが源になって2次放射が発生します(2)．入射波の電界の直交成分[注3]をE_θ^i，E_ϕ^i，散乱波の電界の直交成分を，E_θ^s，E_ϕ^sとすれば，

注2：重ね合わせの原理とは，複数の起電力が存在する回路で，観測点の電圧・電流が各起電力が個別に存在するときの電圧・電流の和に等しくなるという原理．

注3：直交成分は，空間のある観測点における電界ベクトルを直交するθ成分とϕ成分で表す．

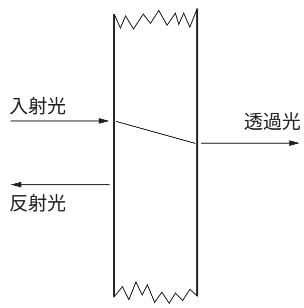


図6　自由空間にあるガラスによる光の反射と透過
物体の表面で反射して残りが透過する．

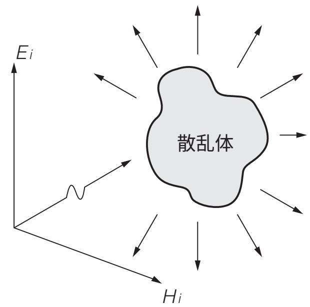


図7　レーダの電波が物体によって散乱するようす
散乱体に平面波が入射すると表面に電流が流れ，これが源になって２次放射が発生する．

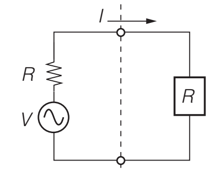


図8　アンテナと給電線路の等価回路
右側の R はアンテナの入力抵抗，左側の R は給電線路の特性抵抗を示す．両者が等しい場合，完全整合になる．

散乱行列を次の式で定義します[(3)]．

$$\begin{bmatrix} E_\theta{}^s \\ E_\phi{}^s \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} E_\theta{}^i \\ E_\phi{}^i \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (8)$$

散乱波の一部は，レーダのアンテナで受信され，戻ってくるまでの時間から距離を知ります．このとき物体で散乱された電力の一部が測定されますが，その量は物体の実効反射面積[注4]に比例します．

● *S* パラメータの測定

図5から S パラメータの測定方法が考えられます．無反射終端抵抗の値は，この導波管の特性インピーダンス（本誌2006年8月号，pp.67-74の連載第21回を参照）に等しくなりますが，一般に線路の特性インピーダンスで終端して反射波を測定できれば，式(7)から S_{11}，S_{21} が得られます．

マイクロ波など高周波の世界では50Ωで終端して測定するのが慣例となっており，ネットワーク・アナライザでも50Ω系[注5]で測定します．したがって被測定線路の特性インピーダンスが50Ωでない場合は，無反射終端になっていないことになります．電磁界シミュレータでは，Sonnetのように50Ω終端がデフォルト設定になっているものと，導波管伝送路向きに開発された経緯があるMicro-Stripesのように，それぞれの線路の特性インピーダンスで終端する場合があります．

このように S パラメータは，端子対（電磁界シミュレータではポートと呼ぶ）の特性インピーダンスを使って規定されているので，特性インピーダンスを変更すれば S パラメータの値も変わるということに注意が必要です．

● アンテナの *S* パラメータ

ワイヤレス・システムが普及するにつれて，アンテナを自作する機会が増えてきました．所望の周波数範囲でアンテナの動作を確認するために，ネットワーク・アナライザを用いて S_{11} を調べる方法があります．アンテナの給電点をポート１とし，自由空間にあるアンテナをブラックボックスと考えたとき，アンテナの損失が小さければ，反射係数である S_{11} の値が小さいほど，このアンテナから空間へ放射された電磁エネルギーが大きいことが分かります．

半波長ダイポール・アンテナの入力インピーダンスの実部は73Ω近くになるので，これを50Ω系で測定した S_{11} はゼロ（無反射）にはなりません．仮に入力インピーダンスが50Ωのアンテナがあれば，**図8**の等価回路に示すように整合が取れます．このときのアンテナの入力電力 P は次の式で得られます．

$$P = I^2 R = \left(\frac{V}{R+R}\right)^2 R = \frac{V^2}{4R} \quad \cdots\cdots (9)$$

ここで V は入力電圧の実効値，R は入力抵抗および特性抵抗．

例えば入力電圧を1［V］とすれば，完全整合の場合の入力電力は5［mW］になります．実際には S_{11} はゼロではないので，次の式によってアンテナの入力電力を求めることができます．

注4：実効反射面積は，レーダ断面積（radar cross section）とも呼ばれている．
注5：同軸線路の減衰定数 α（連載第21回を参照）は特性インピーダンスが50Ω～75Ωで最小になることから，高周波では特性インピーダンスが50Ωや75Ωの線路が使われる．

$$5\,[\mathrm{mW}] \times (1 - |S_{11}|^2) \cdots\cdots (10)$$

S_{11}は電圧比なので，電力では2乗する．

● 散乱行列と量子力学

本連載ではミクロの電磁気学は扱いませんでした．散乱行列という名称はドイツの理論物理学者ハイゼンベルグが提案した「S（散乱）行列」による量子力学モデルを思い出させます．不確定性原理（1927年）は特に有名ですが，行列力学[注6]も量子力学の基本の一つになっています．

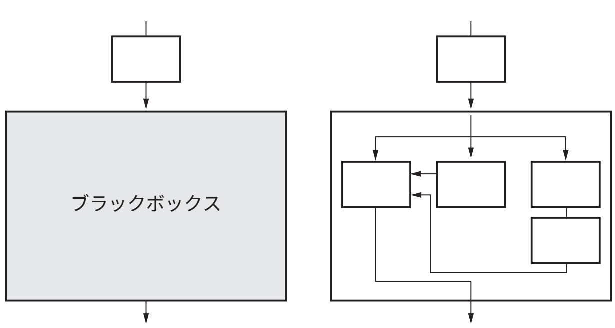
この分野はまったくの門外漢ですが「粒子の衝突・散乱における確率振幅を与える量」という説明から，その挙動をブラックボックスと考えれば，後に電気の世界におけるS行列のアイデアにもつながったのではないかと推理しました．

その証拠は見つかっていませんが，ある光学の専門家によれば「量子論で言う散乱行列は量子力学の波動関数間の関係を表したもので，相互作用前後の波の間にどのような関係があるかを表すという意味では，電気回路のS行列と全く同じ性質だと言える．電気回路では進行波・後進波という二つの波で1ポート分の完全セットになるので，極めて取り扱いが簡単な散乱行列の例と言える」とのことでした．

このように散乱行列というアイデアは，波が散乱される至るところに適用され，レーダやリモート・センシング[注7]，電気回路から量子力学まで，共通の概念と考えられるでしょう．



図9　システムとは
入力（input）された情報が処理（process）されて出力（output）される機構．



（a）ブラックボックス　（b）実際の処理

図10　ブラックボックスの考え方
システムを構成する「処理」のボックスの中身を考えない．

2．システム設計と電磁気学

筆者が駆け出しのエンジニアだったころ，客先で「そもそもシステムって何ですか？」と質問され，説明に困ってしまった経験があります．しどろもどろの部下を見かねて，先輩が**図9**のような絵を描いて「システムとは，このように入力（input）された情報が処理（process）されて出力（output）される機構のことです」と助け船を出してくれました．これは無駄な説明をそぎ落とした見事な図解です．

そのころ社内ではシステム工学[注8]が注目され，使い回しできるサブルーチンを公開することで，ソフトウェアを部品化するという概念が生まれました．また**図10**のような「ブラックボックスの考え方」を学び，システムを構成する**図9**の「処理」のボックスを，特にブラックボックスと呼ぶことも知りました．

このソフトウェアの部品化という運動は，その後C++やJavaといったオブジェクト指向の言語環境にまで発展し，実用的な技術として結実したのは周知の通りです．

● システム思考とは

幼児に写生をしてもらうと，風景はそっちのけで興味のある対象物を細かく描き始めるでしょう．しかし学校の授業では描く順番を教えられ，まず地面や空を大ざっぱに塗り，石や雲は次の段階に描くよう指導されました．この「全体から部分へ」という手順は，大人が子供に伝授すべき絵画のノウハウだったのかもしれません（**図11**）．

このエピソードを思い出したのは，筆者が就職して初めてプラント制御のプログラムを組んだときでした．思いつくままに機器を動かす命令を発し，ついにはスパゲッティ・プログラムが山のように出来上がりました．このときOJT[注9]で受けた先輩の指導によれば，

1）まず全体としてものを考える
2）詳細なメカニズムに立ち入らない

注6：行列力学とは，ハイゼンベルグが提唱した行列式で量子力学を表現する方法．
注7：リモート・センシングとは，観測物から離れてその状態を探査すること．狭義には人工衛星による地球表面の観測．
注8：システム工学とは，大規模で複雑なシステムを統合的に設計・開発するための手法体系．
注9：OJT（on-the-job training）とは，職場の先輩が具体的な業務を通じて後輩を指導・育成する活動．

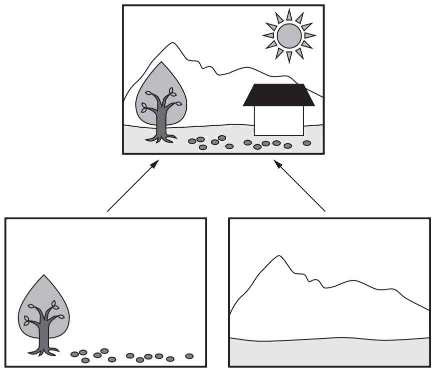


図11 部分から描くか，全体から描くか
幼児は興味のある対象物を細かく描き始める．学校の授業では地面や空を大ざっぱに塗り，石や雲は次の段階に描くよう指導される．

3）機能を中心に抽出する

というのがシステム的な思考だというのです．1）は**図10(a)**のブラックボックスの考え方と同じです．そして2）はブラックボックスの中身の詳細はとりあえず考えないでおくということですが，これは**図9**の「処理」の具体的な方法や手順に立ち入らないということでもあります．そこで「機能」，すなわち何を行うかという項目の抽出に専念することになります．

しかし，この作業で終わったのではモノが出来上がりません．システムの設計では，次の段階としてブラックボックスの中のメカニズムを詳細に具体化しなければなりません．**図10(b)**では，ブラックボックスの中身は複数のモジュール[注10]が矢印でつながっていますが，これは手順を表しており，時間的な遷移を表現しているとも言えます．つまりこの段階ではダイナミック（動的）な設計がなされることを意味しています．

このように「静的から動的へ」という手順が，伝授すべきシステム設計のノウハウというわけですが，改めて絵画のエピソードと比較すると，人間の本来の発想はどうやらこれとは逆のような気がします．つまり絵画もシステム設計も，「部分から全体へ」というのがナイーブな発想なのかもしれません．

ダビンチの絵画は遠近法に忠実な構図をもとにしています．一方，棟方志功の版画は，彫りたい対象物が力強く描かれています．これはDNAの違いかもしれません．ソフトウェアの世界でもアルゴリズム事典(4)に天才の作品が見られるように，システムの「部分」においては，そのような棟方的芸術作品（?）も必要とされるでしょう．

業務でアルゴリズムに専念できればうれしいのですが，システム設計は芸術ではないので，個人プレーは許されません．むしろ日々の仕事ではシステム思考にのっとった定型的な設計を強いられ，ナイーブな衝動を押し殺すことになるので，人一倍ストレスを感じるのかもしれません．



図12 制御工学におけるブロック線図で示した伝達関数
入力信号を X，出力信号を Y としたとき，G が伝達関数．

● 伝達関数という考え方

さまざまな分野でロボットの実用化が進んでいますが，古典的な制御工学では**図12**のブロック線図[注11]に示すような伝達関数を考えます．入力信号を X，出力信号を Y とすれば，伝達関数 G は次の式で表されます．

$$G = \frac{Y}{X} \quad \cdots\cdots (11)$$

あるいは，

$$Y = G \cdot X \quad \cdots\cdots (12)$$

一般に伝達関数はラプラス変換[注12]されたもので表します．例えば**図13**のような単位ステップ関数を入力とするとき，**図14(a)**の伝達関数 $G_a(s)$ は安定なシステムの応答を，また**図14(b)**の伝達関数 $G_b(s)$ は不安定なシステムの応答を示しています．このようにダイナミカル（動的）システムの考え方では，**図12**に示す入出力間の特性は，自然科学や工学の法則で記述できることを前提としています(5)．

ロボティクス[注13]で用いられる直流アンプや直流モータも，**図15**のブロック線図に示すように伝達関数の事例といえるでしょう(6)．

ところで電磁界シミュレータのモーメント法は，回路の金属部分を**図16**に示すメッシュ状に離散化して表面電流を求める手法です．この微小部分はセルあるいはサブセクションなどと呼ばれます．その一つに既知の電流を置いたとき，ほかのセルにおける電界はこの電流にグリーン関数[注14]

注10：モジュールとは，機能を分割した一つの単位．
注11：ブロック線図とは，制御システムの構成を視覚的に表す図法．
注12：ラプラス変換とは，微分で定義される関数を代数的な演算に置き換える手法．
注13：ロボティクス（ロボット工学）とは，機械工学，電子工学に情報工学，人間工学，認知科学，心理学など広範囲な分野を融合した工学．

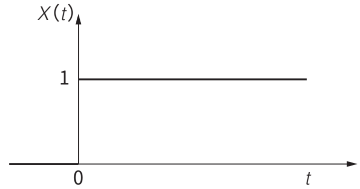


図13　単位ステップ関数

ある時刻 *a* を過ぎると単位大きさだけ変化する関数．ここでは *a*＝0 としている．

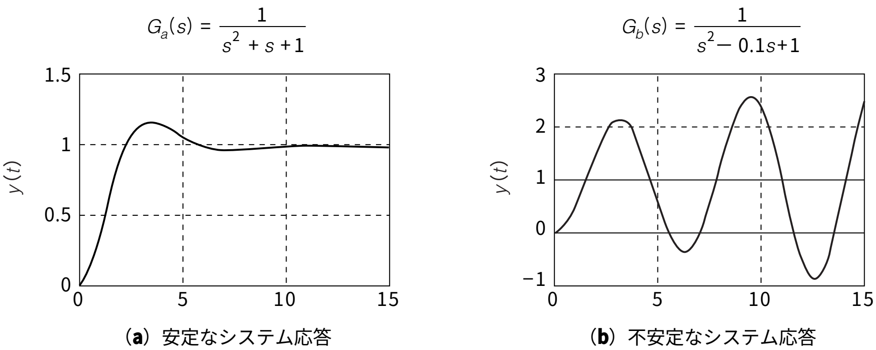


図14　単位ステップ関数に対する応答

(a) は徐々に応答が1に収束するが，(b) は振動しながら発散している．

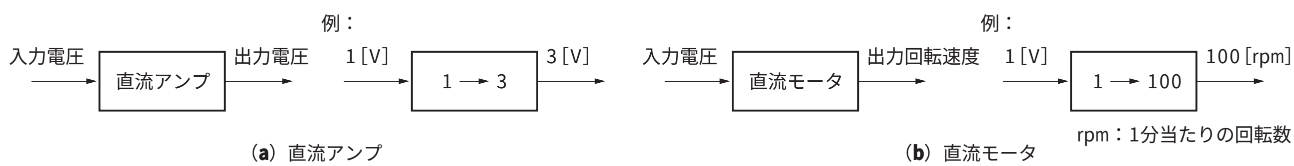


図15　ロボティクスで用いられるブロック線図

(a) はアンプの増幅率が3倍の場合．入力電圧1 [V] では出力電圧が3 [V] となる．(b) は直流モータの伝達関数が100の場合．入力電圧1 [V] では回転速度は100 [rpm] となる．

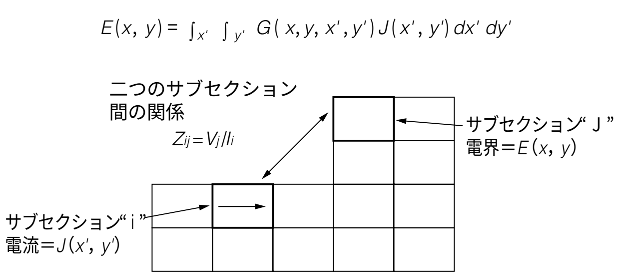


図16　モーメント法は金属部分を離散化して表面電流を求める

微小部分はセルあるいはサブセクションなどと呼ばれる．その一つに既知の電流を置いたとき，ほかのセルにおける電界は，この電流にグリーン関数を掛けて積分することで求めることができる．

を掛けて積分することで求めることができます(7)．関数 $G(x, x')$ は，ある点 x' で生じた現象の効果を点 x へ伝える役割を果たすので，これは伝達関数と考えられます．

● *S*パラメータの接続とホイヘンスの原理

図3と**図9**を並べると，2開口素子は究極のシステム構成であることが分かります．そこで出力をもう一つのシステムの入力につなげていけば，*S*行列が接続されたまとまりも一つの大きなシステムと見なせます．これはブラックボックスの中に幾重にもブラックボックスがあり得ることを意味しており，システムの持つ階層性という特徴を示しています．

*S*パラメータを接続するアイデアは有用です（p.132のコラム「回路の分割と*S*パラメータ」を参照）．電磁界シミュレータのTLM（伝送線路）法は，空間に描いた回路モデルを3次元に細かく分割します．モーメント法は金属表面を離散化しますが，TLM法は空間にある物体や空間自体も区別なく扱い離散化します．次に離散点間を1次元線路（理想的な平行2導体線路）と仮定して，**図17**に示すような最小立体SCN（Symmetrical Condensed Node）をモデル化します(7)．

図18は2次元的な説明図です．一つの節に与えられたパルス波は，ホイヘンスの原理注15に従って次々に隣接する節に伝搬していきます．これは一つのパルス波の過渡応答を逐次的に計算する手法です．電界と磁界を直接解くFDTD（有限差分時間領域）法とは異なり，仮想的な線路に置き換えて電圧と電流で解くことで等価的に電磁界を得るユニークな手法です．したがってSCNの各端子対で*S*行列を定義して，次々にパルス波の伝搬を逐次的に計算していることになります(8)．

注14：グリーン関数は，イギリスの数学者George Green（1793年～1841年）によって考案された．
注15：ホイヘンスの原理とは，一つの波面上のすべての点がそれぞれ2次波を出して次の波面が作られるとする，波面の伝搬に関する原理．

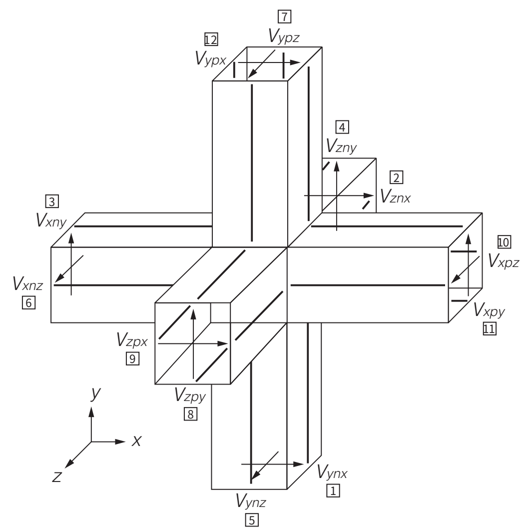


図17　TLM法で離散化した最小立体SCN（Symmetrical Condensed Node）
12対の端子からなり，太線で示した伝送線路対を電圧パルスが伝わる．

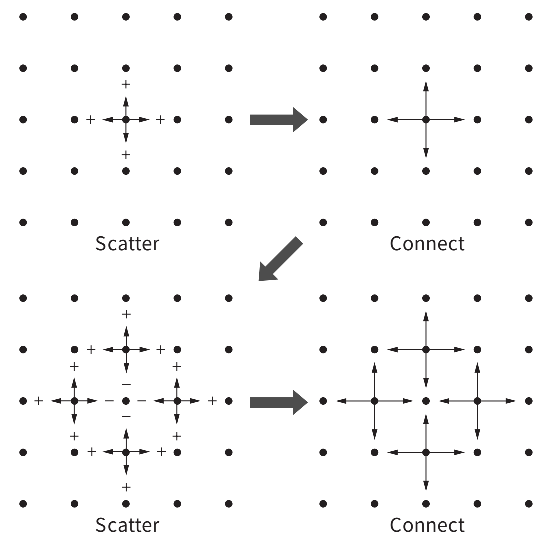


図18　パルス波は隣接する節に伝搬する
一つの節に与えられたパルス波は，ホイヘンスの原理に従って次々に隣接する節に伝搬していく．

● *S*パラメータによるデバイス表現

電磁界シミュレータは当初マイクロ波集積回路の設計に用いられましたが，本連載では動作周波数が高くなるにつれて発生する電磁界現象を数多く扱ってきました．オームの法則だけでは手に負えなくなり，いよいよマクスウェルの方程式の出番となったわけです．これは配線路の電磁的な影響が無視できなくなってきたことを意味します．

初期の電磁界シミュレータは，伝送線路問題を解くのが精いっぱいでした．その後に実現したSPICEサブサーキットを出力する機能は，複雑な線路モデルをシミュレータに生成させることで，回路シミュレータを助ける役割を果たしました．しかし実際の回路では，線路の先にあるICなどのデバイスをすべて含んだシミュレーションが望まれました．デバイスの*S*パラメータ・ファイルがあれば，前項で示した*S*パラメータの接続によって回路全体の*S*パラメータの結果が得られます．

S-NAP/Field注16は回路シミュレータのS-NAPとモーメント法による電磁界シミュレータが融合されたユニークな手法です．回路シミュレータ側で*S*パラメータを接続するのではなく，モーメント法の行列演算にデバイスを埋め込んで計算するので，より現実的な回路に向けて進化をとげた電磁界シミュレータといえるでしょう(9)．ICなどのデバイスを*S*パラメータで表現することで，電磁界シミュレータはよりリアルな回路問題を扱えるようになってきました．

● ブラックボックス化の功罪

回路をそっくりモデリングしたいという電磁界シミュレータの夢は，ブラックボックス化というシステム思考の手法によって現実になりつつあります．反対に複雑化が進む今日のシステム開発は，上流工程においてもブラックボックス化を強いるようになりました．

論理回路の設計・開発におけるCAD，ソフトウェアの設計・開発におけるオブジェクト指向は，いずれもシステムの複雑さが手作りの限界に達したとき，そのブレークスルーとして発明されました．確かに設計者の負担は軽減されましたが，バグが見つかった途端にオブジェクトの中身を丹念に探るはめになり，それまでのコスト節約が一気に吹っ飛ぶこともあります．

昔のシステムは単純明快な構造だったので，バグがすぐ分かるホワイトボックスでした．製造者のみならずユーザにとっても，システムの中身が見えるおかげで，動作状況が直接伝わってくる安心感がありました．

気がつくと身の回りにはブラックボックス化された製品があふれています．設計の複雑さを克服することで性能は向上しましたが，その反面ユーザが「直接対話」することがなくなりました．このため限界を超えた取り扱いに気づかず，思いもよらぬ事故を招くかもしれません．そうであれ

注16：S-NAP/Fieldの詳細は，エム・イー・エルのWebサイト（http://www.melinc.co.jp/）を参照．

Column 回路の分割とSパラメータ

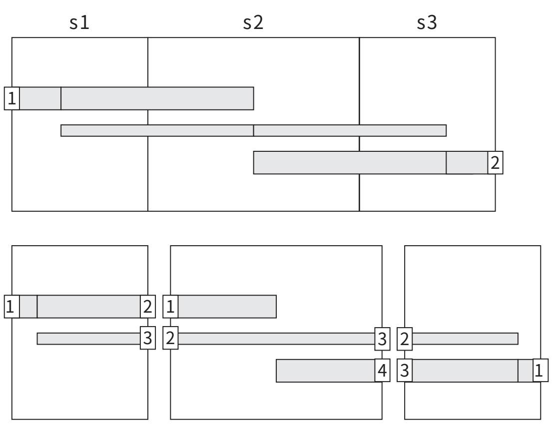
モーメント法は行列演算を行うので，解析時間は離散化したサブセクション数Nの3乗に比例します．このため回路全体を分割することで，計算時間と使用メモリを大幅に減らすことができます．例えば回路を2分割して，それぞれのプロジェクト・モデルのNを半分にすれば，$2(N/2)^3 = N^3/4$となって，行列を解く時間は1/4に短縮されます．

製品版のSonnetにはCircuit Subdivisionという機能がありますが，無償版のSonnet Lite注A-1では，例えば**図A-1**に示すように，回路を手作業で三つに分割してそれぞれシミュレーションします．これはSonnet Liteのメモリ上限16Mバイトを超える回路モデルを解く場合に有効な方法です．

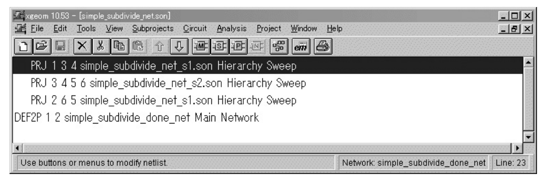
これらの結果を**図A-2**のようにNetlist Projectでつなげれば，**図A-3**のような回路全体の結果が短時間で得られます．ここでサブプロジェクトのs3が，s1の図形を180度回転したものであれば，実際にシミュレーションするのはs1とs2だけでよいので，さらに計算時間を節約できます(7)．

なお**図A-1**のような結合線路では，線路間で水平方向に分割すると，それぞれの線路が結合している部分を分断してしまうため，分割の方向や位置には注意が必要です（注A-1のWebサイトからダウンロードできる日本語マニュアルCircuit Subdivisionの章に分割の具体例が載っている）．

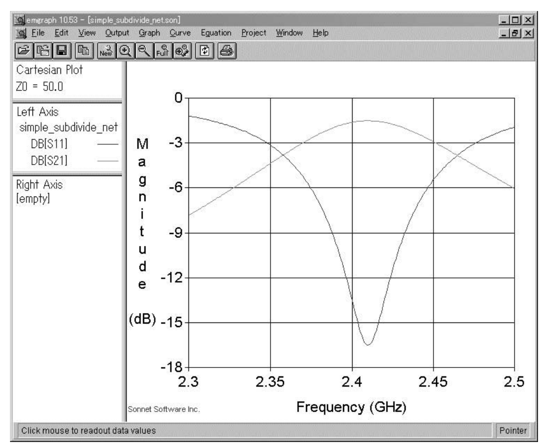
注A-1：無償版のSonnet Liteは，本誌2006年10月号付属CD-ROMに収録されている．Sonnet技研のWebサイト（http://www.sonnetsoftware.co.jp/）からもダウンロードできる．



図A-1　バンドパス・フィルタの全体を三つの部分に分割する
Sonnet Liteのメモリ上限16Mバイトを超える回路モデルを解く場合に有効な方法．



図A-2　Netlist Projectでつなげる
簡易回路シミュレータのNetlist Projectでサブプロジェクトを接続して，回路全体のSパラメータを求める．



図A-3　バンドパス・フィルタのSパラメータ結果
回路全体の結果が得られていることがわかる．

ば，これからのシステムには，自発的に不調を訴えるかける機構を備える必要があるのかもしれません．

参考・引用*文献

(1) 清水俊之，三原義男；マイクロ波工学，東海大学出版会，1975年（第9刷）．
(2) 小暮裕明；電磁界シミュレータで見る2.4GHz帯の電磁波干渉問題，Design Wave Magazine，pp.31-39，2005年7月号．
(3) アンテナ工学ハンドブック，電子通信学会，オーム社，1980年（第1版）．
(4) 奥村晴彦；C言語による最新アルゴリズム事典，技術評論社，1992年（第1版10刷）．
(5) 杉江俊治，藤田政之；フィードバック制御入門，コロナ社，2003年（初版9刷）．
(6) 高橋良彦；ロボティクス入門，裳華房，2004年（第1版）．
(7) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶ高周波の世界，CQ出版社，2003年（第6版）．
(8) C. クリストポロス，加川幸雄訳；TLM伝達線路行列法入門 非定常電磁界解析のためのもうひとつのモデル，培風館，1999年（初版）．
(9) 小川隆博；マイクロ波回路や高密度実装回路などを実装状態で解析できる！回路混在型電磁界シミュレータの基礎と応用，トランジスタ技術，pp.247-252，2001年5月号．

こぐれ・ひろあき
小暮技術士事務所・技術士（情報工学部門）
http://www.kcejp.com/